

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>		<p>FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0</p>
--	--	---



FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

TITULO DEL PROYECTO:

Evaluación de estructuras típicas INVIAS de pavimentos semirrígidos para vías de bajo tráfico empleando el método mecanístico SAMDM 2013

PRESENTADO POR:

Jhosef Nicolás Torres Rendón


Laura Cristina Carvajal Mora

DOCENTE ASESOR:

Mario Alexander Castañeda Lopez


BOGOTÁ, D. C., 1 DE JUNIO DEL 2020

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>		<p>FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0</p>
---	--	---



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5 CO)

Este es un resumen legible por humanos (y no un sustituto) de la [licencia](#). [Advertencia.](#)




Usted es libre de:


Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia


Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>		<p>FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0</p>
--	--	---

Tabla de contenido

1.	Introducción	6
2.	Justificación	7
2.1	Definición del problema	7
2.2	Antecedentes	8
2.3	Alcances y limitaciones	10
3.	Objetivos	12
3.1	Objetivo general	12
3.2	Objetivos específicos	12
4.	Marco teórico	13
4.1	Mecanismos de daño típico en el pavimento	13
4.1.2	Fatiga	13
4.1.2	Deformación permanente	15
4.2	Metodologías de diseño a considerar	16
4.2.1	SAMDM, Método Mecánico -empírico de Diseño de Sudáfrica	18
4.2.2	Guía de diseño de pavimento por el método INVIAS	29
5.	Metodología	34
6.	Resultados	36
7.	Análisis	44
8.	Conclusiones	46
9.	Recomendaciones	47
10.	Referencias bibliográficas	48

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>		<p>FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0</p>
--	--	---

Índice de tablas

Tabla 1: Modulo de elasticidad, profundidad debajo de la superficie	19
Tabla 2: Constantes para bases gruesas de asfalto	21
Tabla 3: Módulo elástico y propiedades del material para bases granulares cementadas, 1996 SAMDM ⁵	24
Tabla 4: Constantes que dependen de la confiabilidad de la vía ⁵	26
Tabla 5: Funciones de transferencia para la sub-formación y la deformación permanente ⁵	28
Tabla 6: Valores del módulo para bases estabilizadas con cemento ¹⁴	30
Tabla 7: Coeficiente estructural a1.....	31
Tabla 8: Espesores mínimos para carpeta asfáltica ²⁰	33
Tabla 9: Resumen de datos necesarios para el cálculo de los esfuerzos	37
Tabla 10: En el siguiente cuadro se muestran los resultados necesarios para el análisis	40
Tabla 11: Resultados de la fatiga efectiva para la CA y BTC;	41

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama de flujo para el procedimiento de análisis de diseño.....	17
Figura 2: Alternativa estructural ¹⁴	30
Figura 3 Gráfico para determinar el coeficiente estructural de capas asfálticas en función del módulo resiliente ²⁰	32
Figura 4: Relación entre el coeficiente estructural para base granular y distintos parámetros resistentes. ²⁰	33
Figura 5 Metodología del proyecto representada mediante un diagrama de flujo	35
Figura 6: Esquema de la estructura de pavimento con los puntos de análisis	36
Figura 7: Esquema de la estructura de pavimento con los puntos de análisis	38
Figura 8: Ingreso de los datos mostrados en la tabla 9 en el software.....	39
Figura 9: Localización de los puntos a evaluar en la estructura de pavimento .	39

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>		<p>FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0</p>
---	--	---

Índice de gráficas

Gráfica I: Relación entre módulos de resiliencia de la subrasante y la fatiga efectiva.....	42
Gráfica II: Número de ejes equivalentes necesarios según el módulo de resiliencia de la subrasante para deformarla.....	43

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO		FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

1. Introducción

En Colombia, como en la mayoría de los países, las vías han sido clave para el crecimiento y desarrollo económico de una Nación, por lo cual, el tipo y la calidad de las vías es fundamental para todo ello. En Colombia solo el 13.61% pertenece a las vías primarias pavimentadas que están en buen estado (Pan-americanas 2019), lo dicho anteriormente, es el resultado de diversos factores, entre ellos, se encuentra el enfoque de este trabajo.

Las normas de diseño de pavimento en Colombia están establecidas por el instituto nacional de vías (INVIAS), que fue adaptado del método AASHTO, de procedencia estadounidense. Al ser un manual adaptando, no se tuvieron en cuenta variables como las propiedades del suelo, el clima, la diferencias en las temperaturas, entre otras.

Por lo tanto, se verificará el método de diseño mostrado por INVIAS, en el cual se evaluarán las estructuras planteadas por EVERSTRESS, un software que brinda esfuerzos y deformaciones de cada capa de la estructura, ligadas como no ligadas, con el fin de brindar datos los cuales serán comparados con el método SAPEM 2013, método sudafricano que permite conocer la vida de fatiga efectiva y el número de ejes en el cual se deforma la estructura de pavimento.

SAPEM 2013 ofrece una amplia carta para varias configuraciones de diseño, incluyendo las estructuras de pavimento con bases estabilizadas con cemento hidráulico. El método analiza la base con cemento como una base granular no ligada cuando esta se fractura y ofrece ecuaciones y constantes empíricas para brindar información de validación a datos de entrada para la realización de cualquier análisis, como son los ejes equivalentes que proporcionan el volumen de tránsito y seguido a esto los espesores de las capas y las propiedades de cada material que las conforman.

Con esto, se puede realizar un análisis comparativo entre los datos de entrada de INVIAS y los resultados de salida del método SAPEM 2013, para dar así un punto de vista de la problemática de vías en el país y con esto, poder encontrar si los datos que se manejan actualmente con el diseño de vías en Colombia son válidos para la sevicialidad y calidad de las mismas, ya que, muchas veces el deterioro de las vías es producto de un mal diseño al tomar valores que son insuficientes con respecto a la resistencia que se requiere para el diseño.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO		FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

2. Justificación

2.1 Definición del problema

En Colombia la infraestructura vial juega un papel muy importante para la economía; por lo cual la calidad es un factor determinante en este crecimiento. La calidad está directamente relacionada con el método de diseño que se emplee, para el caso de Colombia, el instituto nacional de vías es el ente encargado de toda la infraestructura vial, incluyendo el diseño. INVIAS es una adaptación de un método extranjero llamado AASHTO 93.

AASHTO 93 es un método estadounidense semi empírico, el cual permite por medio de ábacos y correlaciones la obtención de altura de capas en la estructura de pavimento. Este método se realizó mediante diversas pruebas de campo, en las cuales fueron clave, variables típicas del sitio, como lo es la subrasante, el clima, y la caracterización del tránsito empleado.

En el momento que INVIAS adapto este método de diseño, no contemplo las posibles diferencias que podría haber entre las variables allí tomadas y las variables trabajadas acá, ya que, una variación en los datos, ya sea en la subrasante o en el clima, pueden cambiar una estructura de pavimento, y así mismo cambiar la forma en cómo se comporta ante la presencia de cargas, mostrando así deformaciones por esfuerzos generados por el tránsito.

SAMDM 2013 es un método semi empírico mecanístico que en su nueva revisión incluyo aspectos de la versión más reciente de la AASHTO (2003). La presente investigación se centrará en el diseño de una base estabilizada con cemento hidráulico ofrecida por SAMDM 2013, que brinda mediante el ingreso de datos como el esfuerzo y la deformación en capas ligadas, la vida efectiva de fatiga y el número estimado de ejes equivalentes que proporcionaría una deformación en las capas y por ende en la capa asfáltica, que afecta la calidad de la vía.

El porcentaje de vías en Colombia en buen estado es muy bajo, por lo cual, es muy importante evaluar la forma en cómo se toman los valores de entrada para diseñar, esto mediante la comparación de resultados de los métodos anteriormente mencionados, ya que, si la deformación ocurre con un número menor de ejes equivalentes al estimado al principio de diseño, se debe

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO		FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

contemplar la posibilidad de revisar el método de diseño aplicado en Colombia, debido a que el país no cuenta con un método de diseño propio, usando valores típicos del territorio nacional, en cambio, se maneja un método extranjero adaptado al diseño de vías.

Cabe aclarar que, aunque se conoce una posible diferencia de las variables que se tomaron en AASHTO 93 con las variables de Colombia, se desprecian, por no contar con la posibilidad de comparar propiedades físicas del suelo, en cambio se tomaran variables típicas para poder realizar los modelamientos de las estructuras de pavimento.

Con todo lo anterior se busca responder ¿hay compatibilidad en las estructuras diseñadas con un método semi empírico como INVIAS a partir de una evaluación hecha mediante un modelo mecánico como SAMDM 2013?

2.2 Antecedentes

En Colombia el diseño de pavimentos se realiza teniendo en cuenta normas y ensayos proporcionados por el instituto nacional de vías INVIAS, el cual brinda diferentes parámetros para la realización de diseños de pavimentos rígidos y flexibles en Colombia.

El manual de diseño de INVIAS se realizó con base a métodos propuestos por AASHTO y PCA, donde cada uno cuenta con diferentes características y espesores pre-dimensionados; INVIAS hizo un comparativo de ambos métodos, analizando más de 70000 diseños, seleccionando 1680 estructuras de pavimento teniendo en cuenta criterios de espesores y parámetros que son característicos del territorio nacional; se desecharon diseños con espesores muy pequeños por parecer frágiles y espesores superiores a 30 cm por estar sobredimensionados, INVIAS da la libertad al diseñador de consultar otro tipo de fuentes para el diseño de una estructura de pavimento.¹

¹ Londoño Naranjo, C. & Álvarez Pabón, J. A. *Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito*. (2008).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO		FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

El método de diseño de AASHTO se realizó con un modelo a escala real, denominado AASHO ROAD TEST, uno de los objetivos de este modelo fue realizar relaciones entre espesores de diseño y repetición de cargas; el modelo contaba con 462 secciones para pavimentos flexibles, que contaba con una estructura de subrasante con CBR entre 2 y 4%, subbase con una mezcla de arena y grava con un CBR entre 28 y 51%, una base con piedra triturada con un CBR con una media entre 85 y 107% y una carpeta asfáltica de mezcla densa con una penetración 85-100. ²

En el 1993 se publica la última modificación de este estudio, el cual aún sigue vigente en Estados Unidos.

El INVIAS es la entidad que avala la realización de proyectos viales en Colombia, como ya se mencionó, esta norma de diseño tiene como base el estudio realizado por la AASHTO en Estados Unidos, donde contaban con datos como tránsito, clima, humedad y tipología del suelo, sabiendo que éstas son propias del sitio; al generar la adaptación de estas variables en el diseño colombiano de vías esto presenta incertidumbre en los resultados experimentales y arrojando posibles errores porcentuales al compararlos con los valores teóricos dados por una normativa que se realizó en suelo estadounidense.

INVIAS no toma en cuenta los cambios en las variables usadas en la elaboración de la norma, ya que el clima, el tránsito y humedad en Colombia no presentan las mismas características que en Estados Unidos, generando incertidumbre en la veracidad de los resultados

SAPeM 2013 es un manual sudafricano, que cubre todos los aspectos de la ingeniería de pavimentos, proporcionando al lector asesoramiento y orientación para diseñar pavimentos más rentables, modernos y seguros, sin reemplazar los principios de la ingeniería.

Este manual abarca 14 capítulos donde incorpora todas las perspectivas y aspectos de la ingeniería de pavimentos, incluye todas las especializaciones asociadas que van desde túneles hasta la geotecnia, también evalúa y facilita la selección de materiales. SAPeM 2013 representa a todos los sectores de la

² M, G. C. *Antecedentes al diseño moderno de pavimentos y el experimento vial de la AASHO*. (2012).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO		FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

industrial vial, este incluye a los contratistas, autoridades viales, proveedores, investigadores y a los fabricantes de la maquinaria. ³

La estructura de SAPEM está distribuida en 8 módulos: antecedentes, laboratorio y pruebas, investigación, diseño, documentación y licitación, implementación, gestión de calidad y post- construcción, y allí se reparten los 14 capítulos que costa este manual.⁴

Para pavimentos flexibles, el método de diseño mecánico- empírico sudafricano (SAMDM), es el más utilizado en Sur África, la versión de 1996 divulga valores típicos iniciales del módulo de resiliencia y la resistencia de los materiales, para la construcción de carreteras en dicho país. Los valores sobre los modelos de daños siguen vigentes de la versión 1996, estos modelos están divididos para los principales grupos de materiales en la construcción de carreteras, como lo son: La fatiga de asfalto de mezcla caliente, base granular independiente, capa de subbase, capas de base y subbase cementadas; y deformación permanente.

El método AASHTO desarrollo un diseño mecanicista-empírico guía para todos los tipos de pavimento, este método se publicó en el 2004, y es muy complejo, tanto así que Sudáfrica incluyo algunos aspectos de este en la versión SAMDM, que se conoció como el método de diseño de pavimento sudafricano, SAPDM.⁵

2.3 Alcances y limitaciones

INVIAS proporciona modelos de estructuras de pavimento, las cuales manejan alternativas, pero, para fines de este trabajo, se realizará el modelamiento de una estructura con estabilización de una de sus capas con cemento.

Para el diseño y cálculo de los esfuerzos y deformaciones de las capas de la estructura de pavimento, es necesario conocer las variables que afectan este

³ Initiative, A. N., The, O. F., National, A. & Agency, R. *SOUTH AFRICAN Chapter 11 Documentation and Tendering*. (2013).

⁴ South African National Roads Agency limited. *SOUTH AFRICAN PAVEMENT ENGINEERING MANUAL Chapter 9 Materials Utilisation and Design*. (2013).

⁵ Initiative, A. N., The, O. F., National, A. & Agency, R. *SOUTH AFRICAN Chapter 10 Pavement Design*. (2013).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO		FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

diseño, para fines de esta investigación, se consideraran tres factores de tránsito, con volúmenes bajos, intermedios y altos. Para tránsito bajo la norma INVIAS ofrece estructuras ya establecidas con sus respectivas alturas, para volúmenes medios y altos será necesario realizar los cálculos pertinentes.

Los resultados de cada estructura calculada serán sometidos a un programa de modelamiento, esto con el fin de evaluar la compatibilidad que existe entre un método y otro, al realizar un comparativo de resultados y analizar las tolerancias que existen en ambos resultados.

El método sudafricano SAMD 2013 nunca se ha adaptado formalmente a un diseño de estructura vial en Colombia, sin embargo, en la norma INVIAS menciona este método de diseño, por lo cual, es tan importante verificar sus resultados con los obtenidos al analizar las estructuras calculadas mediante el manual de INVIAS, donde se espera que los resultados muestren cierta cercanía entre ellos.

En el momento de la modelación se debe tener claro que los datos de entrada con los cuales se analizarán los esfuerzos en cada capa no son propios del suelo, sino, son obtenidos por medio de datos que nos brinda la propia norma, ya que no se cuenta con la posibilidad de obtener datos del suelo, esto debilita la comparación de la resistencia de un suelo propiamente del territorio nacional al adaptado por Invias del AASHTO 93.

En Colombia el uso de SAPEM 2013 no está normalizado por el instituto nacional de vías, lo que implica que los resultados son meramente investigados, y los cuales, no se podrán respaldar por datos teóricos. Los resultados pueden no tener una veracidad alta, debido a que un método es estadounidense y el otro sudafricano, donde su principal limitante es que cada modelo de desempeño cuenta con valores que son típicos del sitio, como módulos del suelo, CBR y demás, lo que muestra una posible brecha entre un resultado y otro.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO		FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la estructura de pavimento diseñada por la metodología INVIAS empleando modelos de desempeño del método sudafricano SAMDM 2013.

3.2 Objetivos específicos

1. Diseñar una estructura de pavimento por metodología INVIAS
2. Modelar la estructura de pavimento semirrígido de análisis elástico multicapa por medio de un software, y así mismo obtener estados de esfuerzo y deformación de cada capa.
3. Emplear los modelos de diseño de SAMDM 2013 a partir de los resultados de las modelaciones
4. Realizar un análisis comparativo del método INVIAS con el método sudafricano SAMDM 2013.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>		<p>FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0</p>
---	--	---

4. Marco teórico

4.1 Mecanismos de daño típico en el pavimento

4.1.2 Fatiga

Las capas estabilizadas con cemento son capaces de soportar esfuerzos a tensión y módulos mucho mayores en comparación a las capas granulares, de este modo, su aporte estructural es mayor.

La vida de fatiga de una capa cementada en el método de diseño mecanicista Sudafricano (SAMDM), está definido en tres fases diferentes: La pre-fisuración, la vida de fatiga efectiva y la granular equivalente.⁶

La repetición de carga genera la aparición de micro fisuras, provocando la pérdida de resistir tensión y la disminución del módulo de elasticidad, reduciendo la capacidad funcional de la estructura del pavimento; las micro fisuras pueden aumentar, y generar fisuramiento por fatiga, las grietas inician en la parte inferior de la capa y se van extendiendo hasta la parte superior de esta, entre más gruesa sea una capa, más se demora en aparecer las grietas.⁷

En la guía de pavimento de Australia, cuando una capa estabilizada con cemento alcanza la fatiga, puede tener otra vida útil, a la capa cementada agrietada se le considera como material granular equivalente, de este modo, se le asigna un módulo de material granular; teniendo en cuenta lo anterior, si la capa estabilizada con cemento se construye con un material de alta calidad, el modulo

⁶ López, P., Martínez, E., Espinosa, A. L. & The, S. INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND Análisis racional de diseño y desempeño de pavimentos con capas de suelos mejorados. (2019). doi:10.3233/STAL190197

⁷ Francois, A., Ali, A. & Mehta, Y. Evaluating the impact of different types of stabilised bases on the overall performance of flexible pavements. *Int. J. Pavement Eng.* 20, 938–946 (2019).

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>		<p>FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0</p>
---	--	---

residual puede llegar a ser mayor que el modulo del granular solo sin estabilizar.
8

INVIAS expresa el N_f como el número de aplicación de carga en que se producirá la falla del material, y se calcula para cada una de las etapas de pavimento con ecuaciones de fatiga o funciones de transferencia, teniendo en cuenta el valor de la sollicitación, estos pueden ser deformación unitaria, específica (ϵ) o esfuerzo (σ).

Ecuación 1: Número de aplicaciones de carga que producirían la falla⁹

$$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\epsilon \text{ ó } \sigma} \right)^{K_2}$$

N_f = Número de aplicaciones de carga que producirá falla

K_1, K_2 = Coeficientes experimentales

ϵ = Deformación unitaria o específica

σ = Esfuerzo

⁸ AUSTROADS. 2) AUSTROADS Guide to Pavement Technology (2009). (Part 2). Pavement Structural Design. (2004). doi:10.1680/dmp.41141.233

⁹ Estrada, F. S. Guías para la formación de las estrategias de rehabilitación. *guía Metodol. para la Rehabil. Paviment. INVIAS Colomb.* parte 5, 90 (2008).

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>		<p>FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0</p>
---	--	---

4.1.2 Deformación permanente

Se considera que el pavimento falla en conjunto, ya que se analiza como una sola estructura, por lo que cada capa tendrá efecto una sobre la otra ¹⁰. Cuando alguna de sus capas presenta deterioro excesivo, fisuramiento o deformaciones permanentes; la aparición de ahuellamientos en el pavimento flexible se debe principalmente a la deformación en las capas subyacentes y/o a la deformación en la carpeta asfáltica.¹¹

La deformación permanente en la capa de rodadura es por la incapacidad que tienen las mezclas asfálticas de soportar cargas, y depende principalmente de los agregados pétreos y el ligante asfáltico que se ha empleado. Por otro lado, cuando una de las capas internas del pavimento falla, puede que inmediatamente no se refleje en la superficie, y que por un periodo de tiempo no se requiera ningún reforzamiento, pero la estructura se encuentra debilitada. ¹²

El aumento en la carga del tráfico y la presión que ejerce los neumáticos de forma cíclica, hace que se produzca fatiga en la estructura de pavimento y continuamente lleve a la deformación permanente, que se produce en forma de ahuellamiento en las capas superiores en lugar de las subrasantes. ¹³

Cuando ocurre una rehabilitación del pavimento, la práctica de rehabilitación de pavimento se Nueva Zelanda incluye la verificación a la deformación unitaria de la subrasante, y se hace una comparación de las deformaciones en función del tránsito, antes de ser rehabilitada y después.

¹⁰ Nottingham, T. & User, N. E. Gillett, Simon D. (2002) Accuracy in mechanistic pavement design consequent upon unbound material testing . PhD thesis , University of Nottingham . (2002)

¹¹ Sandoval Sandoval, D. C., Delgado Alamulla, H. & Harnica Anguas, P. Análisis de varianza del efecto de deformación permanente de. *Secr. Comun. Y Transp.* (2005).

¹² Guerrero, N. H. & Chang Albitres, C. M. La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en el Perú. *Carreteras* **4**, 75–82 (2012).

¹³ Yang H.Huang. Pavement Analysis and Design. *Education* 775 (2004).

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>		<p>FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0</p>
---	--	---

La ecuación 2: presenta la deformación vertical de la subrasante.⁹

$$\varepsilon_z = K_3 \left(\frac{1}{N_t} \right)^{K_4}$$

N_t = Numero de aplicaciones de carga hasta la falla

ε_z = Deformación unitaria vertical de compresión en la superficie de la subrasante (m/m)

K_3, K_4 = Coeficientes experimentales

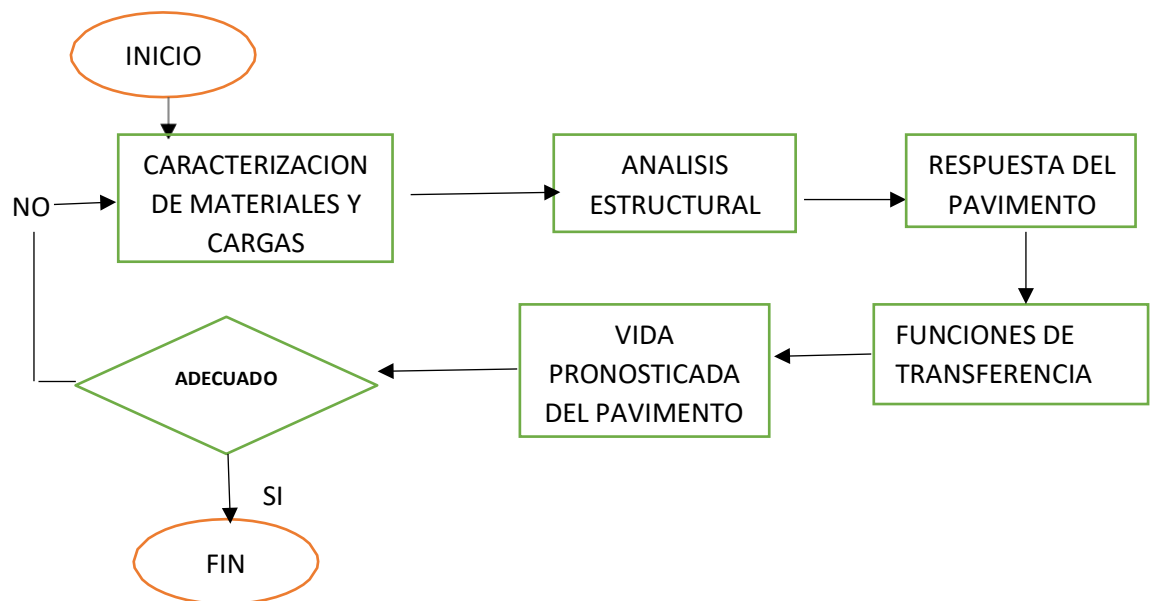
4.2 Metodologías de diseño a considerar

Los métodos de diseño de pavimento deben permitir que las entidades a cargo del desarrollo de la red vial generen planes financieros confiables a largo plazo, teniendo como base la capacidad de estructura requerida. Existen fallas prematuras que no necesariamente es error de la metodología de diseño, sino que son atribuidas a la información insuficiente durante la investigación, la mala interpretación y la violación de los presupuestos durante la construcción.¹⁴

⁹Estrada, F. S. Guías para la formación de las estrategias de rehabilitación. *guía Metodol. paara la Rehabil. Paviment. INVIAS Colomb.* parte 5, 90 (2008).

¹⁴ Ministerio de Transporte & INVIAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito. 103 (2007).

Figura 1: Diagrama de flujo para el procedimiento de análisis de diseño.



Fuente: Overview of South African Mechanistic Pavement Design Method ¹⁵

El periodo de diseño puede ser dado desde se inicia la elaboración del proyecto hasta que la vía pierda su funcionalidad, ya sea por el deterioro que produce el tránsito y/o por los agentes ambientales. Para diseñar un pavimento se requiere de variables asociadas a la geometría de las calzadas, los factores ambientales, las cargas de tránsito, el soporte del suelo, los materiales de construcción y la calidad de estos, y el mantenimiento. ¹⁶

¹⁵ H. L. THEYSE, M. DE BEER, A. F. C. R. & A. Overview of South African Mechanistic. 6–17

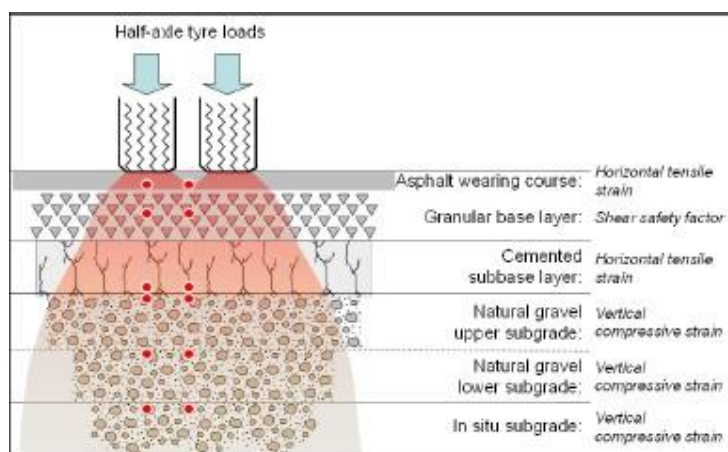
¹⁶Theyse, H. L., De Beer, M., Maina, J. W. & Kannemeyer, L. 0 th CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS FOR SOUTHERN AFRICA-1-INTERIM REVISION OF THE SOUTH AFRICAN MECHANISTIC-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN METHOD FOR FLEXIBLE PAVEMENTS. 1–20

4.2.1 SAMDM, Método Mecánico -empírico de Diseño de Sudáfrica

La filosofía de diseño del método mecánico- empírico de Diseño de Sudáfrica (SAMDM), para las capas de bases y subbases cementadas es la deformación permanente, la fatiga efectiva y falla por aplastamiento.⁵

Los parámetros críticos dependen del tipo de material y el modo en el que este falla, estos se calculan por medio de la ubicación de la estructura del pavimento. El parámetro crítico se calcula debajo del eje y en la intersección de los ejes; entre más grueso sea el pavimento, más grande será la zonas de fluencia. Para una práctica de campo, es necesario conocer la capacidad estructural, entonces, se calcula el parámetro crítico que hay debajo y en medio de los ejes, de este modo se trabaja con el dato más bajo.

Imagen 1: Posiciones de análisis para parámetros críticos.⁵



Fuente: South African Pavement Engineering Manual, Chapter 10

⁵ Initiative, A. N., The, O. F., National, A. & Agency, R. *SOUTH AFRICAN Chapter 10 Pavement Design*. (2013).

4.2.1.1 Fatiga de asfalto de mezcla caliente

El agrietamiento por fatiga es el indicador del final de la vida útil del pavimento, cuando la estructura de pavimento ya no tiene capacidad de resistir cargas de tránsito; esto es controlado por la resistencia a flexión de la estructura, que está en función del diseño de mezcla y el espesor de pavimento ¹⁷

La capacidad estructural o la vida de fatiga, representa el agrietamiento sobre un área definida de la capa de rodadura. Esta área depende de la confiabilidad asignada por la categoría de la vía, por ejemplo, en este trabajo investigativo se utilizó el 70% de confiabilidad para una categoría C, esto quiere decir que el 30% de área de la carretera está agrietada.

El módulo de elasticidad está dado por la **tabla**, con un valor de 4000 Mpa, ya que el grosor de la capa de rodadura se diseñó con 80mm y con una mezcla asfáltica caliente BC.

Tabla 1: Modulo de elasticidad, profundidad debajo de la superficie

Código	Profundidad (d) debajo de la superficie (mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
AG	≤ 50	3000
BC	≤ 100	4000
	$100 > d \leq 150$	5000
	$150 > d \leq 200$	6000
	$200 > d \leq 250$	7000

Nota:

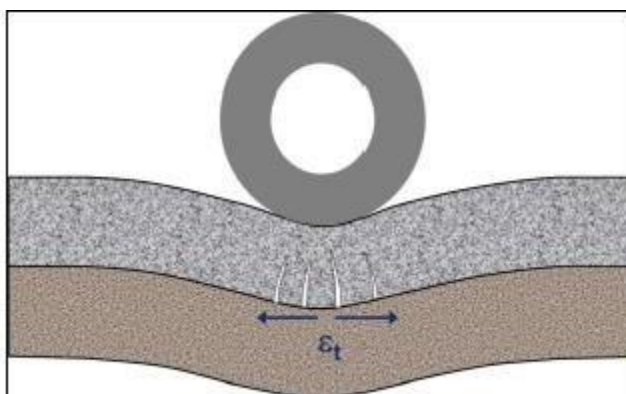
1. AG, Clasificación discontinua
2. BC, Asfalto de mezcla en caliente con clasificación continua

Fuente: South African Pavement Engineering Manual, Chapter 10

¹⁷ Perera, A. DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS CRÍTICOS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLES EN COSTA RICA. (2015).

Las capas de asfalto se modelan como capas ligadas, que se doblan bajo la aplicación de cargas, la repetición de cargas del tránsito induce a aparición de grietas que se van formando en la parte inferior de la capa propagándose hacia la superficie; el esfuerzo de tracción máximo en la parte inferior de las capas bituminosas es el parámetro crítico que se utiliza para determinar la resistencia a la fatiga, como se muestra en la imagen 2, donde ϵ_t representa la deformación por tracción. Las capas bituminosas se distinguen entre las capas de superficie delgada, menos de 50 mm y las capas bituminosas gruesas con más del 75 mm de espesor.¹⁸

Imagen 2: Parámetro crítico y ubicación de las capas asfálticas



Fuente: South African Pavement Engineering Manual, Chapter 10

En SAMDM se utiliza la ecuación 2 para encontrar la vida de fatiga de la capa asfáltica es necesario halla la deformación de tracción en la parte inferior de la capa bituminosa, al utilizar un espesor de 80mm, se halla las constantes α , β con la tabla 2, teniendo en cuenta la rigidez del asfalto que dependen de la ecuación 3.

¹⁸ Fernandes, J. D. A. Proposta de Conceção e Conservação de Pavimentos para a Rede Rodoviária de São Tomé e Príncipe. (2019).

Ecuación 2:

$$Nf = 10^{\alpha(1 - \frac{\log \epsilon t}{\beta})}$$

Donde:

Nf= Vida de fatiga

α, β = Constantes

ϵt = Deformación a tracción

Tabla 2: Constantes para bases gruesas de asfalto

Nivel de confiabilidad	Bases gruesas de asfalto (> 75 mm)											
	Rigidez del asfalto (MPa)											
	1000		2000		2551,06		3000		5000		8000	
	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β
95%	16,44	3,38	16,09	3,36	N/a	N/a	15,78	3,33	15,52	3,32	15,09	3,23
90%	16,81	3,45	16,43	3,43	N/a	N/a	16,11	3,40	15,73	3,36	15,30	3,27
80%	17,25	3,54	16,71	3,49	N/a	N/a	16,26	3,44	15,83	3,38	15,39	3,29
70%	17,43	3,58	16,86	3,52	16,60	3,49	16,40	3,47	15,92	3,40	15,48	3,31
50%	17,81	3,67	17,17	3,58	N/a	N/a	16,68	3,52	16,10	3,44	15,65	3,35

Fuente: South African Pavement Engineering Manual, Chapter 10

Ecuación 3:

Espesor de capa (t)	Factor de Campo
< 25 mm	1
≥ 25mm	$0.0489 * t - 0.2225$

Donde, t depende del espesor de la capa de asfalto.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO		FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

4.2.1.2 Capas de base y subbase estabilizadas con cemento

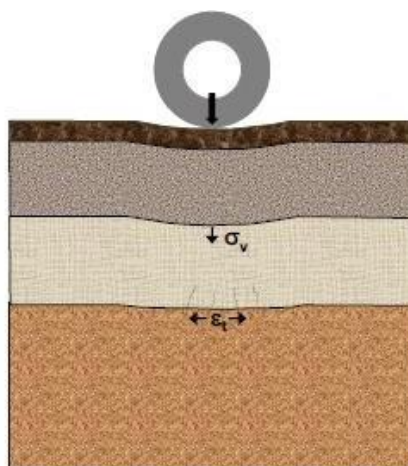
Las capas de base y subbase estabilizadas con cemento, se analizan como capas ligadas para la fatiga efectiva, que se produce debido a las repeticiones de carga producidos por el tránsito, generando agrietamientos estructurales por que los esfuerzos a cortante y a tensión superan a los admisibles; las grietas inician en la parte inferior de la capa y se van prolongando hasta la parte superior de esta, entre más gruesa sea una capa, más de demora en aparecer las grietas.

19

Cuando la rigidez efectiva de una BTC empieza a mostrar propiedades similares a la de una capa granular no ligada, significa que inicia una condición terminal para la BTC, dándose el nombre de estado granular equivalente. Lo anterior, se reduce al término fatiga efectiva, que es el típico agrietamiento por fatiga; para calcular la vida útil efectiva se utiliza el parámetro de tensión horizontal en la parte inferior de la capa.

¹⁹ Theyse, H. L., Maina, J. W., Kannemeyer, L. & Corporation, P. M. *Revision of the South African flexible pavement design method: mechanistic-empirical component. 9th CAPSA Proceedings* (2007).

Imagen 3: Parámetros críticos y ubicaciones para capas ligeramente cementadas⁵.



Fuente: South African Pavement Engineering Manual, Chapter 10

En la BTC también se analiza el aplastamiento vertical en la parte superior de la capa, utilizando el esfuerzo de compresión (ver imagen 3). A la estructura se le verifica el aplastamiento como parámetro de control para la fatiga, ya que cualquier aplastamiento tiene un impacto significativo en la estructura de pavimento.

La tabla 3 arroja los valores de las propiedades resilientes de los materiales, si se tiene en cuenta el valor de la resistencia inconfiada como 2250 kPa, se halla el módulo de elasticidad de un material granular cementado de 2000 Mpa, de esta manera la deformación de 125 viene siendo la deformación que lleve a la falla el material; cuando llegue al final de su vida de fatiga, que es cuando inicia la etapa granular, se toma un módulo elástico de 300 MPa.

⁵ Initiative, A. N., The, O. F., National, A. & Agency, R. *SOUTH AFRICAN Chapter 10 Pavement Design*. (2013).

Tabla 3: Módulo elástico y propiedades del material para bases granulares cementadas, 1996 SAMDM⁵

Clase	Modulo elástico (MPa)	Deformación (εb)	UCS (kPa)	Clase granular equivalente	Módulo elástico (Mpa)
C3	2000	125	2250	EG4	300
C4	1500	145	1125	EG5	200

Fuente: South African Pavement Engineering Manual, Chapter 10

Para hallar los números de ejes estándar, que puede ser, cuando inicie a verse las fisuras o en estado avanzado de estas, se utiliza la ecuación 4, donde las constantes a y b que indican el estado de las fisuras y que dependen de la confiabilidad de la vía, está dado en la tabla 4; el esfuerzo a compresión en la capa superior y la resistencia inconfiada recomendada se encuentran en la tabla 3.

Ecuación 4: Estado inicial o avanzado de las fisuras⁵

$$N_{ci/ca} = 10^{\frac{a(1 - \frac{\sigma_v}{UCS})}{b}}$$

$N_{ci/ca}$: Número de ejes estándar, estado inicial o avanzado de las fisuras

σ_v : Esfuerzo de tracción en la capa superior

UCS : Resistencia inconfiada (KPa), tabla 3

a y b: Constantes, tabla 4

⁵ Initiative, A. N., The, O. F., National, A. & Agency, R. *SOUTH AFRICAN Chapter 10 Pavement Design*. (2013).

Para la vida de la fatiga efectiva se utiliza la ecuación 5, se tiene en cuenta las constantes dadas en la tabla 4, el esfuerzo horizontal de tracción en la capa interior y lo divide el valor que lleva a la ruptura, un factor de laboratorio de campo que depende del espesor en la capa dada en la ecuación 6.

Ecuación 5: Vida de fatiga efectiva⁵

$$N_{eff} = SF \times 10^{\frac{c(1-\epsilon)}{d\epsilon_b}}$$

N_{eff} = Fatiga efectiva

SF = Factor de laboratorio de campo

ϵ = Deformación de tracción horizontal

c y d = Constantes, tabla 3

ϵ_b = Deformación, ver tabla 4(ϵ_b)

Ecuación 6:

Espesor de capa	Factor de Campo
< 102 mm	1
102 mm a 319mm	$10^{(0.00285t-0.293)}$
>419 mm	8

⁵ Initiative, A. N., The, O. F., National, A. & Agency, R. *SOUTH AFRICAN Chapter 10 Pavement Design*. (2013).

Tabla 4: Constantes que dependen de la confiabilidad de la vía ⁵

Constante						
Confiabilidad	Iniciación de las grietas		Agrietamiento avanzado		Fatiga efectiva	
	a	b	a	B	c	d
50% (Categoría D)	8,216	1,21	8,894	1,31	7,06	7,86
70%	N/a	N/a	N/a	N/a	6,93	7,73
90% (Categoría B)	7,706	1,31	8,384	1,23	6,87	7,66
95% (Categoría A)	7,506	1,1	8,184	1,2	6,84	7,63
95% (Categoría A)	7,386	1,09	8,064	1,19	6,72	7,49

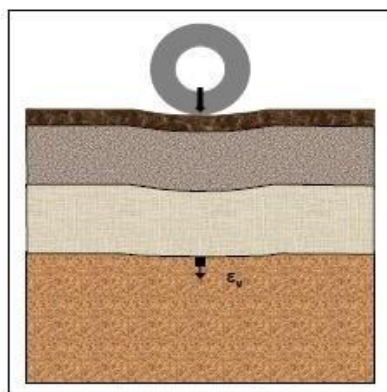
Fuente: South African Pavement Engineering Manual, Chapter 10

⁵ Initiative, A. N., The, O. F., National, A. & Agency, R. *SOUTH AFRICAN Chapter 10 Pavement Design*. (2013).

4.1.1.3 Deformación permanente de subrasante

La deformación permanente en la subrasante se manifiesta en cada capa de la estructura de pavimento, como se ve en la imagen 4.

Imagen 4: Parámetro crítico y ubicación para capas seleccionadas y subrasante



Fuente: South African Pavement Engineering Manual, Chapter 10

El método SAPDM utiliza la ecuación 7 para encontrar la deformación permanente en la subrasante, esta es calculada utilizando el esfuerzo vertical a compresión que llega desde la parte superior de la capa, para las funciones de transferencia en la subrasante es necesario saber el tipo de ahuellamiento permitido, ya que se maneja una constante para 10mm y 20mm, que también dependen de la confiabilidad que se vaya a trabajar.

⁵ Initiative, A. N., The, O. F., National, A. & Agency, R. *SOUTH AFRICAN Chapter 10 Pavement Design*. (2013).

Ecuación 7: Deformación permanente ⁵

$$N_{PD} = 10^{(a - 10 \log \varepsilon_v)}$$

N_{PD} : Numero de ejes estándar para establecer el nivel de deformación permanente

ε_v : Esfuerzo a compresión vertical

a : Constante

Tabla 5: Funciones de transferencia para la sub-formación y la deformación permanente ⁵

Confiabilidad	Constante	
	a	
	10 mm Profundidad de ahuellamiento	20mm Profundidad de ahuellamiento
50% (Categoría D)	33,7	36,7
70%	33,47	36,47
90% (Categoría B)	33,38	36,38
95% (Categoría A)	33,35	36,35
95% (Categoría A)	33,3	36,3

Fuente: South African Pavement Engineering Manual, Chapter 10

⁵ Initiative, A. N., The, O. F., National, A. & Agency, R. *SOUTH AFRICAN Chapter 10 Pavement Design*. (2013).

4.2.2 Guía de diseño de pavimento por el método INVIAS

El método de diseño por INVIAS para bajo tránsito, propone unas alternativas estructurales, estas alternativas involucran capas convencionales como lo son: Tratamiento Superficial Doble, Base granular, Subbase Granular, Suelo estabilizado con Cemento Portland, Mezcla Densa en frío Tipo2, Suelo estabilizado con emulsión, Mezcla Densa en Caliente Tipo 2, Afirmado y por último la capa Subrasante¹⁴

INVIAS propone 6 alternativas que se pueden utilizar donde no haya un afirmado existente:

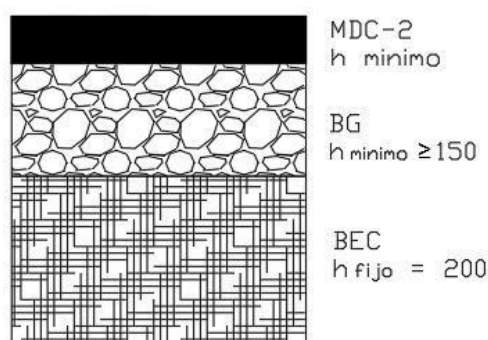
Alternativa 1:	TSD	+	BG	+	SBG
Alternativa 2:	TSD	+	BG	+	BEC
Alternativa 3:	MDF-2	+	BG	+	SBG
Alternativa 4:	MDF-2	+	BEE-3	+	SBG
Alternativa 5:	MCD-2	+	BG	+	SBG
Alternativa 6:	MCD-2	+	BG	+	BEC

Fuente: Instituto Nacional de Vías

Para los espesores en la capa granular, INVIAS propuso un espesor fijado en 150 mm por temas de convivencia constructiva, y la capa subyacente, en este caso una base estabilizada con cemento, es de 200 mm fijo el espesor, también por temas logísticos constructivos.

¹⁴ Ministerio de Transporte & INVIAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito. 103 (2007)

Figura 2: Alternativa estructural ¹⁴



Fuente: Instituto Nacional de Vías

Los valores del módulo de elasticidad para las bases estabilizadas con cemento están dados en la tabla 6, presenta el modulo del material antes de ser sometido a cargas de transido, y después, cuando inicia la fase de estado granular equivalente. La relación de Poisson varía de 0.10 a 0.20 para los agregados que son estabilizados con cemento. ¹⁴

Tabla 6: Valores del módulo para bases estabilizadas con cemento ¹⁴

Tipo de material	Módulo de elasticidad, material impacto (MPa)	Módulo de elasticidad, material deteriorado por tránsito (MPa)
Agregado estabilizado con cemento	5,000 a 10,000 (Típico 7,000)	700
Agregados estabilizados con cemento, gradación abierta	5000	350
Suelo-cemento	350 a 10,500 (típico 3,500)	175

¹⁴ Ministerio de Transporte & INVIAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito. 103 (2007)

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO		FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

Fuente: Instituto Nacional de Vías

.El coeficiente estructural de la capa asfáltica está relacionado con el tipo de carga que se va a solicitar y la clasificación climática por temperatura, ver tabla 6.

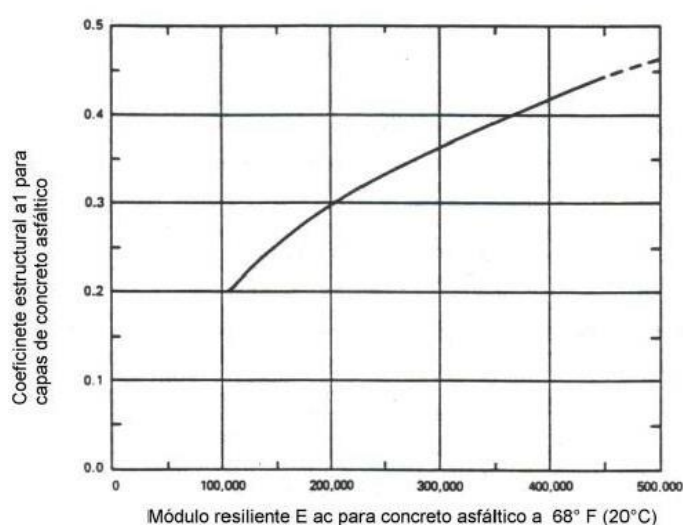
Tabla 7: Coeficiente estructural a_1 de la capa asfáltica

Tipo de capa		Clasificación climática por temperatura	a_i
Descripción de la capa	Nomenclatura		
Mezcla asfáltica densa en caliente tipo 2	MDC-2	Frío	0,44
		Templado	0,41
		Cálido	0,37
Mezcla asfáltica densa en frío tipo 2	MDF-2	Frío	0,41
		Templado	0,37
		Cálido	0,34
Suelo estabilizado con emulsión asfáltica	BEE-3	Todas las categorías	0,14
Suelo estabilizado con cemento portland	BEC	Todas las categorías	0,14
Base granular	BG	Todas las categorías	0,14
Subbase granular	SBG	Todas las categorías	0,12
Afirmado que cumple la especificación INV. Artículo 311	AFR-1	Todas las categorías	0,8
Afirmado que no cumple la especificación INV. Artículo 311	AFR-2	Todas las categorías	0,6

Fuente: Instituto Nacional de Vías

Con base a la tabla anterior, el resultado obtenido del coeficiente estructural se utiliza en ábaco de la figura 3, para determinar el módulo resiliente para concreto asfáltico.

Figura 3 Gráfico para determinar el coeficiente estructural de capas asfálticas en función del módulo resiliente²⁰

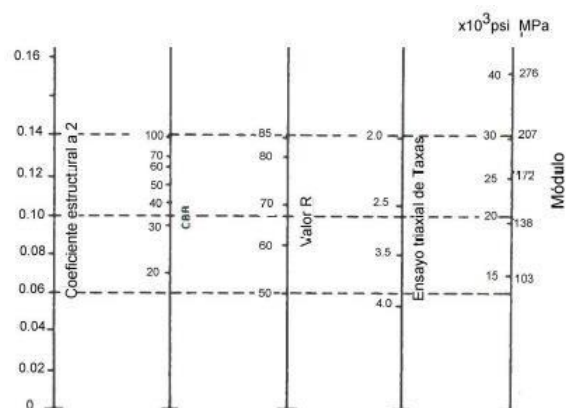


Fuente: Diseño de Pavimento Método AASHTO 93

En la Figura 4 se muestra un ábaco de diseño que permite calcular mediante el coeficiente estructural y el CBR el módulo de resiliencia en ksi, con el cual se calcula el número de ejes equivalentes que generan fatiga efectiva y deformaciones permanentes.

²⁰ AASHTO-1993. Diseño de Pavimentos – AASHTO 93. 246 (2006).

Figura 4: Relación entre el coeficiente estructural para base granular y distintos parámetros resistentes.²⁰



Fuente: Diseño de Pavimento Método AASHTO 93

La carpeta asfáltica se define mediante los espesores mínimos mostrados en la tabla 8, donde el tránsito que se maneja para un volumen bajo es de medio millón de ejes equivalentes y que se toma 3 pulgadas de espesor para una MDC-2

Tabla 8: Espesores mínimos para carpeta asfáltica ²⁰

W18 (10^6)	Espesores mínimos (in)	
	Capa asfáltica	BG
< 0,05	TSD	4
0,05-0,15	2	
0,15 - 0,5	2,5	
0,5 - 2,0	3	6
2,0 - 7,0	3,5	
> 7,0	4	

Fuente: Diseño de Pavimento Método AASHTO 93

²⁰ AASHTO-1993. Diseño de Pavimentos – AASHTO 93. 246 (2006).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO		FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

5. Metodología

Para la realización de este proyecto fue necesaria la consulta con el manual de bajo volúmenes que proporciona Invias, ya que, para fines de este estudio, solo se realizara la evaluación de solo una alternativa que propone el método. Se escoge una que cumpla con los objetivos de estudio, la cual debe tener una capa con una base tratada con cemento. Seguido de esto, se deben calcular los valores de las propiedades de cada capa. Para la capa asfáltica se debe obtener los espesores que se obtienen mediante el ábaco proporcionado por Invias, para la obtención del módulo de resiliencia es necesario conocer la temperatura y la cual será la típica en el diseño (20°C), para el cálculo de propiedades como módulos de resiliencia de la BTC y BG, se usaron los ábacos ya mencionados y los CBR típicos de cada una, cabe aclarar que cada dato se obtiene de manera teórica, ya que no se contaron con los mecanismos y laboratorios para la obtención de cada una.

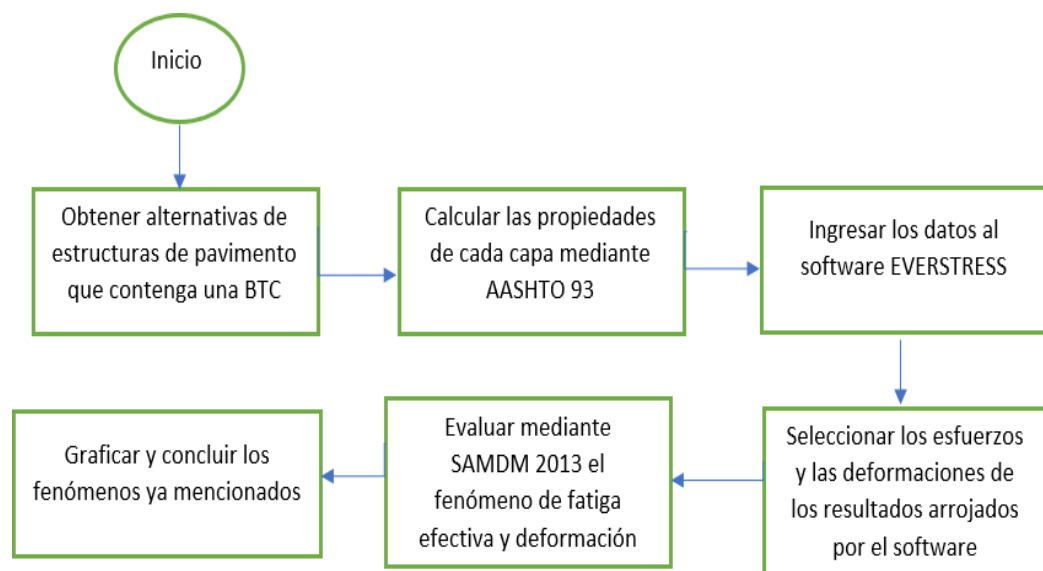
El resumen de estos datos se mostrará en los resultados, por lo cual, el siguiente paso es el modelado de esta estructura en el software EVERSTRESS, que mediante las propiedades ya mencionadas, permite conocer los esfuerzos y deformaciones en puntos específicos, estos puntos serán en la fibra inferior de la carpeta asfáltica, en la fibra inferior de la base tratada con cemento y en la parte superior de la subrasante, es claro tener estos puntos claros, ya que el software nos arroja una variedad de resultados y que no son solicitados para efectos del trabajo.

Estos resultados serán registrados y mostrados en los resultados, los cuales servirán para realizar la evaluación mediante el método SAMDM 2013, que permite conocer los ejes equivalentes que causan en las capas a analizar los fenómenos de fatiga efectiva y deformación permanente necesarios para realizar el análisis entre un método y el otro.

Esta evaluación se realizará mediante ecuaciones semi empíricas mecanicistas, que dependen de los espesores y constantes que se obtienen con las propiedades de la capa a analizar y que son mencionadas anteriormente. Con esto se obtendrán los resultados necesarios para realizar la evaluación correspondiente y verificar la efectividad de las alternativas propuestas por el método INVIAS, cabe aclarar que los resultados obtenidos son con fines

académicos y que no representan la verdad absoluta del método de diseño de INVIAS, ya que, las propiedades se trabajaron con datos típicos y no con resultados obtenidos directamente de un laboratorio.

Figura 5 Metodología del proyecto representada mediante un diagrama de flujo

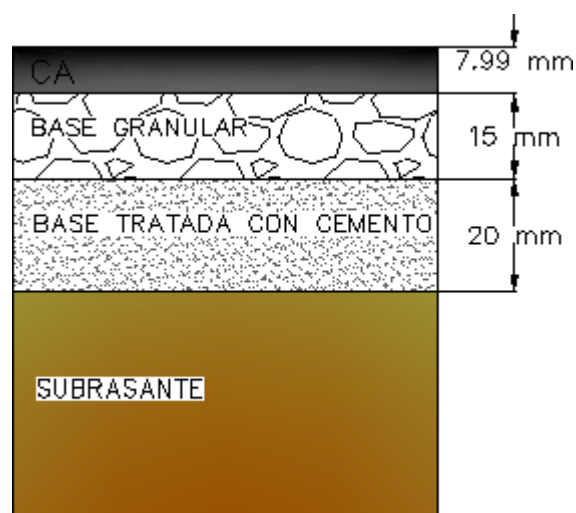


Fuente: Autor propio

6. Resultados

En los anexos se encontrarán con los resultados arrojados por el software, y que fueron usados para realizar las tablas que se verán en el presente ítem. Se necesitan los esfuerzos a tracción en la capa inferior de la carpeta asfáltica y de la base estabilizada con cemento, el esfuerzo a compresión en la parte superior de la subrasante como se muestra en la siguiente figura.

Figura 6: Esquema de la estructura de pavimento con los puntos de análisis



Fuente: Manual de diseño de pavimento asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito

Conociendo la alternativa a usar, se procede a realizar la obtención de datos necesarios para el modelamiento mostrados anteriormente, y con cada uno de estos datos, se procede a realizar una tabla que muestre los datos de cada capa, con el fin de proceder a la modelación.

Tabla 9: Resumen de datos necesarios para el cálculo de los esfuerzos

Capas	Espesor (mm)	Núm. Estructural	MR (MPa)	Relación Poisson
CA	76,2	0,41	2551,06	0,35
BG	150	0,14	144,79	0,35
BTC	200	n/a	5000	0,15
SR	n/a	n/a	82,7	0,5

Fuente: Autor propio

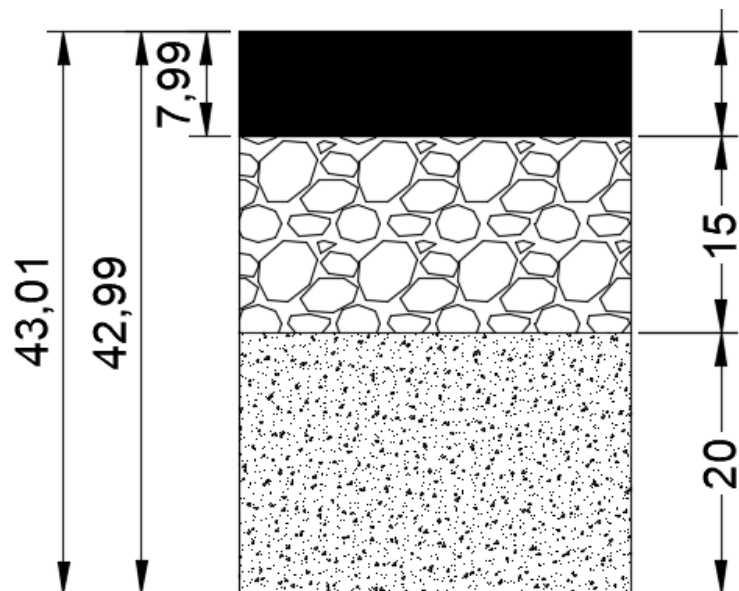
En el caso de la base tratada con cemento y la subrasante no se calcula el módulo de resiliencia, para el caso de la BTC se obtiene mediante la tabla 6, que ofrece datos típicos para una base tratada con un agregado tratado con cemento y con gradación abierta; y en el caso de la subrasante, se obtiene por medio del CBR con la siguiente correlación.

$$MR(PSI) = 1500 * CBR$$

Las relaciones de Poisson son tomadas por valores típicos de cada capa. Estos datos son ingresados en el software como se muestra a continuación, donde lo único que varía es el módulo resiliente de la subrasante.

Estos datos son ingresados en el software EVERSTRESS, los cuales, son los mismos datos expresados en la tabla 9, y que la única variación que tendrán, son los módulos de resiliencia de la subrasante, en donde se tomaron 4 tipos, con su respectivo modulo cada uno y que son reflejados en la tabla 10. A continuación se mostrará un esquema de la estructura de pavimento, en donde se muestran los puntos a evaluar.

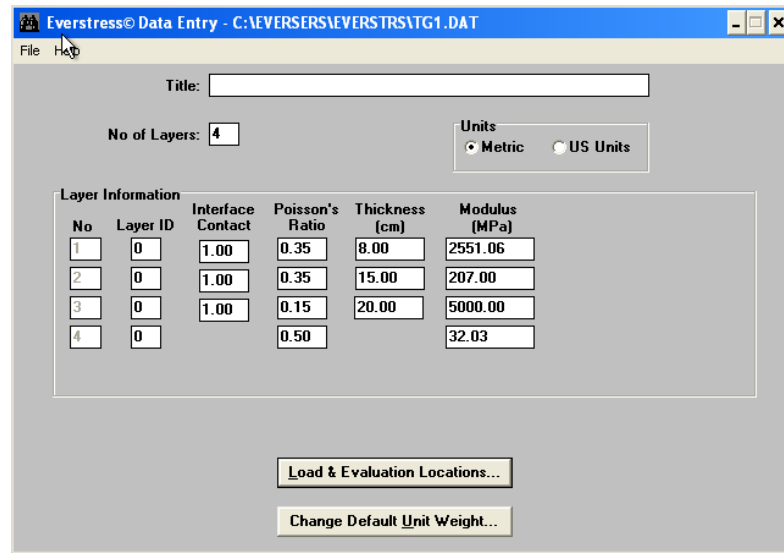
Figura 7: Esquema de la estructura de pavimento con los puntos de análisis



Fuente: Manual de diseño de pavimento asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito

Y con esto, es posible ingresar los datos solicitados por el software EVERSTRESS, con sus respectivas coordenadas de estudio.

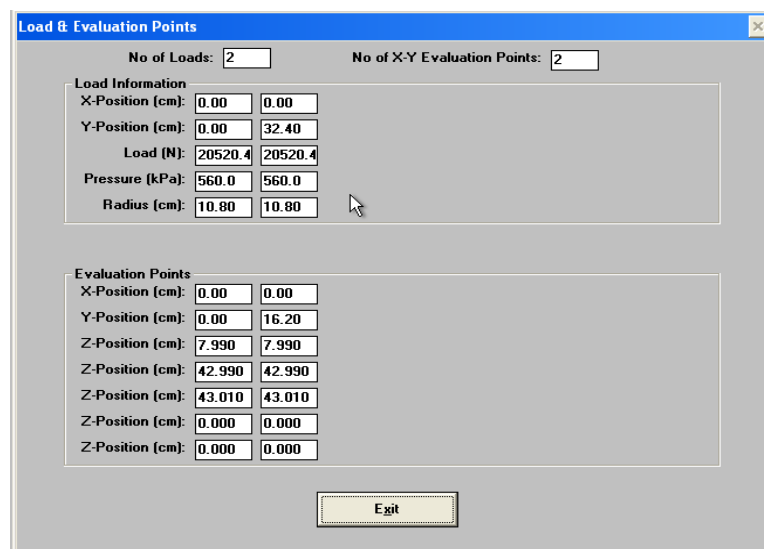
Figura 8: Ingreso de los datos mostrados en la tabla 9 en el software



No	Layer ID	Interface Contact	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Modulus (MPa)
1	0	1.00	0.35	8.00	2551.06
2	0	1.00	0.35	15.00	207.00
3	0	1.00	0.15	20.00	5000.00
4	0		0.50		32.03

Fuente: Autor propio

Figura 9: Localización de los puntos a evaluar en la estructura de pavimento



Load Information	
X-Position (cm):	0.00
Y-Position (cm):	0.00
Load (N):	20520.4
Pressure (kPa):	560.0
Radius (cm):	10.80

Evaluation Points	
X-Position (cm):	0.00
Y-Position (cm):	0.00
Z-Position (cm):	7.990
Z-Position (cm):	42.990
Z-Position (cm):	43.010
Z-Position (cm):	0.000
Z-Position (cm):	0.000

Fuente: Autor Propio

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO		FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

Los resultados que se obtuvieron se mostraran a continuación, en donde, para fines de este trabajo, se tomarán los datos de deformación en los puntos de estudio mostrados en la figura 7 y figura 8.

Tabla 10: En el siguiente cuadro se muestran los resultados necesarios para el análisis

	SR1	SR2	SR3	SR4
CBR (%)	3	4	8	10
MR (psi)	4500	6000	12000	15000
MR (MPa)	31,026	41,369	82,737	103,421
Deformación unitaria de tracción en la CA (μm)	215,7	218,13	223,33	224,78
Deformación de tracción en la BTC (μm)	82,31	78,12	67,17	63,4
Deformación de compresión en SR (μm)	150,9	142,71	121,47	114,22
Neff CA	3,16,E+05	2,99,E+05	2,68,E+05	2,59,E+05
Neff BTC	4,14,E+06	4,43,E+06	5,31,E+06	5,65,E+06
NPD SR	3,66E+14	6,39E+14	3,20E+15	5,92E+15

Fuente: Autor propio

La tabla 10 muestra datos informativos con esfuerzos en μm tanto para tracción como para compresión en los puntos solicitados a estudio, a continuación, se mostrará la tabla con deformaciones en los puntos mencionados anteriormente, los resultados mostrados son expresados en unidades de micrómetros.

Tabla 11: Resultados de la fatiga efectiva para la CA y BTC;

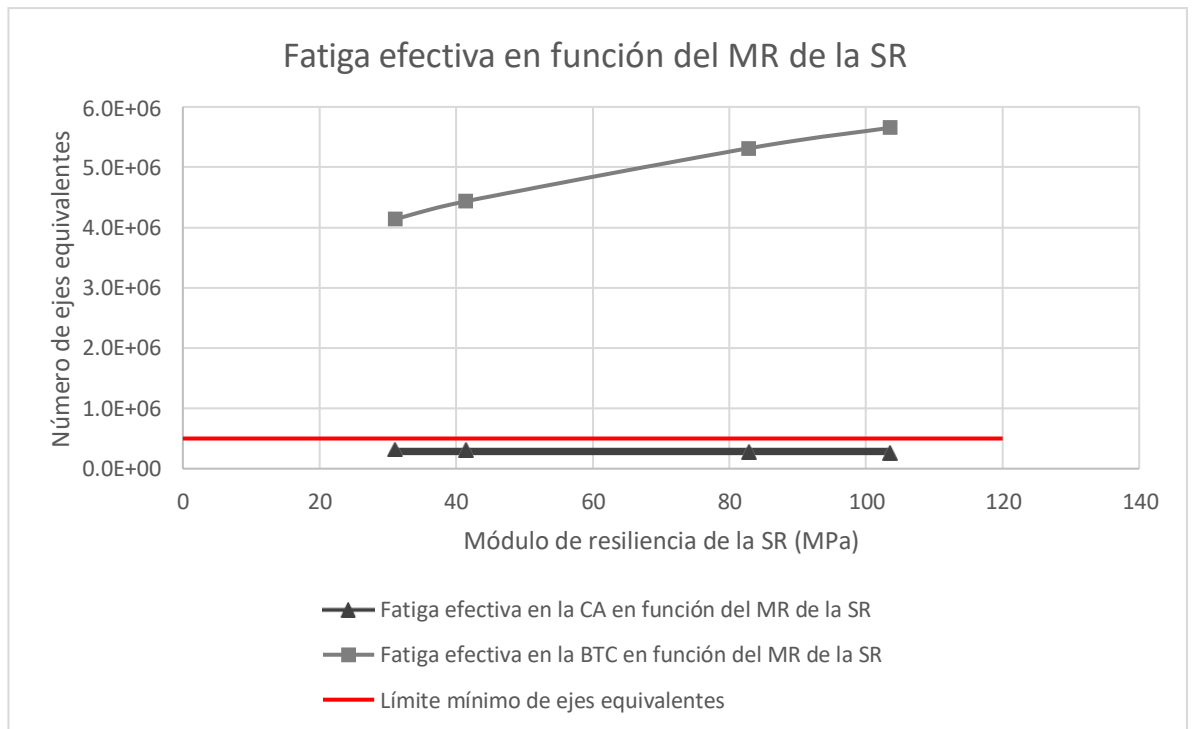
Neff CA	3,16,E+05	2,99,E+05	2,68,E+05	2,59,E+05
Neff BTC	4,14,E+06	4,43,E+06	5,31,E+06	5,65,E+06
NPD SR	3,66E+14	6,39E+14	3,20E+15	5,92E+15

Fuente: Autor propio.

Con estos datos se realizan los gráficos correspondientes para realizar la interpretación de datos, estos representan la relación entre módulos de resiliencia y los números de ejes equivalentes que provocan el fenómeno de fatiga efectiva en la fibra inferior de las capas mencionadas.

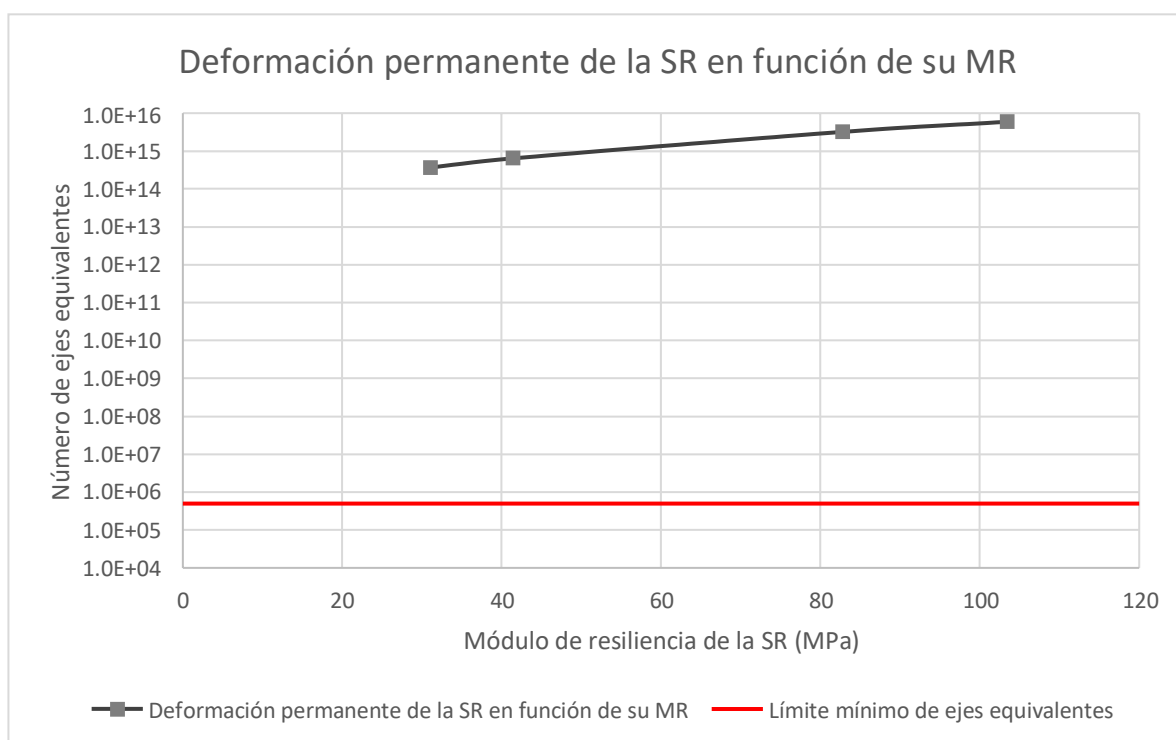
Para la obtención de la fatiga efectiva de la CA se usará la ecuación 2 correspondiente de acuerdo al SAMDM, de la misma forma se calcula la fatiga efectiva para una BTC y que se muestra en la ecuación 4. El análisis de la subrasante es diferente, ya que en esta capa se presenta deformación permanente debido a las cargas y que afecta la calidad de la estructura de pavimento, por lo cual, se obtiene el número de ejes equivalentes que producirán en la subrasante deformación permanente mediante la ecuación 7. Con lo anterior se grafican la fatiga efectiva y la deformación permanente, y donde en cada una se muestra el límite de ejes equivalentes respectivos para un tránsito de volumen bajo.

Gráfica I: Relación entre módulos de resiliencia de la subrasante y la fatiga efectiva



Fuente: Autor propio

Gráfica II: Número de ejes equivalentes necesarios según el módulo de resiliencia de la subrasante para deformarla



Fuente: Autor propio

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>		<p>FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0</p>
---	--	---

7. Análisis

En la tabla 10, se ven los resultados que se obtienen mediante el programa EVERSTRESS, en donde la única variación es el módulo de resiliencia de la subrasante, que en la capa asfáltica no muestra resultados coherentes, en donde la deformación unitaria en el punto mostrado de la **figura 7**, aumenta a medida que aumenta la capacidad de resiliencia de la subrasante, esto muestra la falta de relación que hay entre una variable y otra.

Como se vio anteriormente, los resultados de la BTC y la subrasante muestran una relación directa con el aumento del módulo de resiliencia de la subrasante, mostrando un aumento de ejes equivalentes para llegar al fenómeno en estudio (deformación permanente para la subrasante y fatiga efectiva para la BTC), por el contrario, la capa asfáltica no muestra variación. En la **gráfica I**, se puede ver el crecimiento de la BTC ya mencionado, mostrando una tendencia lineal, relacionando directamente el módulo de resiliencia de la SR con la capacidad de la BTC de soportar más ejes equivalentes sin que el fenómeno de la fatiga efectiva se presente, claro está, que las propiedades con las cuales se diseñaron a la hora de realizar el modelo deben mantenerse en todo momento. Aumento

En esta misma grafica se puede ver el comportamiento de la carpeta asfáltica a la variación del módulo de resiliencia de la subrasante, por lo cual se muestra un comportamiento constante. Sin embargo, la capa asfáltica presenta fatiga efectiva con un numero de ejes equivalentes menor al mínimo (el mínimo de ejes equivalentes es 500.000 para un tráfico de un volumen bajo). Los resultados son muy cercanos al límite, esto muestra que el espesor mínimo que ofrece el método de diseño de INVIAS, no es el mínimo para una evaluación mediante el método de SAMDM.

En la **gráfica II**, se muestra el comportamiento de la subrasante para el fenómeno de deformación permanente, mostrando un resultado que en comparación con los otros, los valores son extremadamente altos, donde para que haya una deformación permanente en la subrasante el número de ejes equivalentes es muy alto, por lo cual, es claro que para una vía que presenta transito bajo, las capas que constituyen la estructura de pavimento presentan propiedades y espesores altos y que son respaldados con los resultados de la **gráfica II**, ya que, como se mencionó anteriormente, la subrasante requiere un

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO		FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

número muy alto de ejes equivalentes para que se presente este fenómeno, generando así un desequilibrio entre las capas mencionadas, ya que, en la mayoría, los resultados de ejes son similares entre sí.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>		<p>FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0</p>
---	--	---

8. Conclusiones

Con los análisis anteriores es claro concluir la cercanía que hay en algunos parámetros de las metodologías de diseño estudiadas en el presente estudio, ya que, si no cumplen los mínimos establecidos por INVIAS, su cercanía es alta, sin embargo en la capa de subrasante, la evaluación mediante SAMDM arroja resultados que a priori, muestran un sobredimensionamiento en el diseño, ya que la desviación entre los resultados de las capas de Base tratada con cemento y la capa asfáltico con la subrasante es muy amplia.

Se demuestra que el diseño por parte de Invias proporciona a la estructura de pavimento espesores que según lo visto anteriormente proporcionan una alta resistencia ante las cargas requeridas a las cuales será sometida la estructura. Se sabe que el tránsito de bajo volumen maneja un número de ejes por debajo del medio millón, y que no representa a la estructura cargas que soliciten estabilización de una base más una base granular, donde se sabe que la calidad de este es alta (una capa granular puede manejar un CBR superior al 85%), por lo cual es evidente los resultados de deformación permanente de la subrasante, ya que la capas mostradas en la **figura 6** proporcionan a la estructura una alta resistencia de diseño, en comparación de la resistencia requerida.

Las estructuras de pavimento deben mantener una cercanía en la magnitud entre la resistencia que se requiere y la resistencia con la que se diseña, y en donde se cumpla que la primera sea menor que la segunda; esto se evidencia en los resultados mostrados, donde la resistencia de diseño de la subrasante es muy elevada, y esto, no es beneficioso en términos de costos, ya que es una vía que no cumple parámetros de vía terciaria.

La alternativa estudiada muestra parámetros que deberían ser reevaluados, debido a que la configuración de esta capa no es la adecuada para el tipo de tránsito empleado en está.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO		FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0
---	--	---

9. Recomendaciones

Como se vio anteriormente, el diseño propuesto por Invias tiene desequilibrios en cada una de sus capas, por lo cual se recomienda realizar el diseño por AASHTO, aplicando la metodología sugerida por el método. Está claro que las estructuras propuestas por INVIAS no cumplen los requisitos evaluados y sugeridos por SAMDM, por lo cual se sugiere investigar y crear un manual de diseño de pavimentos que brinde información de valores típicos reales de los suelos del territorio nacional, en cuanto a los volúmenes de tránsito bajo, es necesario re evaluarlos, ya que, una estructura con una carga baja, no debería incluir una base estabilizada con una base granular, ya que sobredimensiona el diseño

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>		<p>FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0</p>
---	--	---

10. Referencias bibliográficas

1. Londoño Naranjo, C. & Álvarez Pabón, J. A. *Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.* (2008).
2. M, G. C. *Antecedentes al diseño moderno de pavimentos y el experimento vial de la AASHO.* (2012).
3. Initiative, A. N., The, O. F., National, A. & Agency, R. SOUTH AFRICAN Chapter 1 Documentation and Tendering. (2013).
4. South African National Roads Agency limited. *SOUTH AFRICAN PAVEMENT ENGINEERING MANUAL Chapter 9 Materials Utilisation and Design.* (2013).
5. Initiative, A. N., The, O. F., National, A. & Agency, R. *SOUTH AFRICAN Chapter 10 Pavement Design.* (2013).
6. López, P., Martínez, E., Espinosa, A. L. & The, S. INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND *Análisis racional de diseño y desempeño de pavimentos con capas de suelos mejorados.* (2019). doi:10.3233/STAL190197
7. Francois, A., Ali, A. & Mehta, Y. Evaluating the impact of different types of stabilised bases on the overall performance of flexible pavements. *Int. J. Pavement Eng.* **20**, 938–946 (2019).
8. AUSTROADS. 2) AUSTROADS Guide to Pavement Technology (2009). (Part 2). Pavement Structural Design. (2004). doi:10.1680/dmp.41141.233
9. Estrada, F. S. Guías para la formación de las estrategias de rehabilitación. *guía Metodol. paara la Rehabil. Paviment. INVIAS Colomb.* **parte 5**, 90 (2008).
10. Nottingham, T. & User, N. E. Gillett , Simon D . (2002) Accuracy in mechanistic pavement design consequent upon unbound material testing . PhD thesis , University of Nottingham . (2002).
11. Sandoval Sandoval, D. C., Delgado Alamulla, H. & Harnica Anguas, P. *Análisis de varianza del efecto de deformación permanente de.* *Secr. Comun. Y Transp.* (2005).
12. Guerrero, N. H. & Chang Albitres, C. M. La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en el Perú. *Carreteras* **4**, 75–82 (2012).
13. Yang H.Huang. Pavement Analysis and Design. *Education* 775 (2004).
14. Ministerio de Transporte & INVIAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito. 103 (2007).
15. H. L. THEYSE, M. DE BEER, A. F. C. R. & A. Overview of South African

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO</p>		<p>FECHA: JUNIO DE 2020 VERSIÓN 1.0</p>
---	--	---

Mechanistic. 6–17 (1996).

16. Theyse, H. L., De Beer, M., Maina, J. W. & Kannemeyer, L. 0 th CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS FOR SOUTHERN AFRICA-1-INTERIM REVISION OF THE SOUTH AFRICAN MECHANISTIC-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN METHOD FOR FLEXIBLE PAVEMENTS. 1–20 (2011).
17. Perera, A. DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS CRÍTICOS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLES EN COSTA RICA. (2015).
18. Fernandes, J. D. A. Proposta de Conceção e Conservação de Pavimentos para a Rede Rodoviária de São Tomé e Príncipe. (2019).
19. Theyse, H. L., Maina, J. W., Kannemeyer, L. & Corporation, P. M. *Revision of the South African flexible pavement design method: mechanistic-empirical component. 9th CAPSA Proceedings* (2007).
20. AASHTO-1993. Diseño de Pavimentos – AASHTO 93. 246 (2006).